

Complejidad geomorfológica y su asociación con la vegetación acuática sumergida en el litoral de Yucatán

María de los A Liceaga-Correa¹, Edgar J González², Luis A Rincón-Sandoval¹, Héctor Hernández-Núñez¹, E Betzabeth Palafox-Juárez^{1,3,4}, Eduardo Cuevas^{1,5*}

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Historial del artículo:

Recibido 27 de diciembre de 2023

Aceptado 16 de junio de 2025

Publicado 4 de septiembre de 2025

READ IN ENGLISH:

<https://doi.org/10.7773/cm.v2025.3458>

AUTOR DE CORRESPONDENCIA

* E-mail: eduardo.cuevas@uabc.edu.mx

¹ Laboratorio de Percepción Remota y SIG, Departamento de Recursos del Mar, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, 97310 Mérida, Yucatán, México.

² Departamento de Ecología y Recursos Naturales, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, 04510 Ciudad de México, México.

³ Departamento de Observación y Estudio de la Tierra, la Atmósfera y el Océano, El Colegio de la Frontera Sur, 77014 Chetumal, Quintana Roo, México.

⁴ Programa de Investigadoras e Investigadores por México, Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación, Ciudad de México, México.

⁵ Instituto de Investigaciones Oceanológicas, Universidad Autónoma de Baja California, 22860 Ensenada, Baja California, México.

RESUMEN. En la costa norte de la Península de Yucatán se encuentran ecosistemas marinos someros con extensas comunidades de vegetación acuática sumergida, incluidos los pastos marinos y macroalgas. Este estudio describe la complejidad geomorfológica del fondo marino litoral de Yucatán, México, y su asociación con comunidades de vegetación acuática sumergida, siendo el primero de su tipo en esta región. Este trabajo es relevante porque las interacciones ecológicas entre el fondo marino y los organismos que lo habitan definen la configuración espacial de los ecosistemas, así como los procesos ecológicos, muchos de los cuales proveen beneficios a la sociedad humana. Los objetivos de este estudio fueron (1) delimitar espacialmente unidades geomorfológicas discretas (estructuras y zonas) a partir de sus componentes de profundidad, pendiente y aspecto; (2) describir las abundancias relativas de grandes grupos de vegetación acuática sumergida (pastos marinos, algas verdes, algas rojas, algas pardas y césped algal); y (3) evaluar la asociación entre la geomorfología y la presencia de los grupos de vegetación estudiados. Esta información establece una línea base para los análisis biológicos, ecológicos y oceanográficos de los ecosistemas marinos costeros en el sureste de México. Además, los resultados de este estudio son clave para la toma de decisiones relacionadas con el desarrollo costero, manejo adaptativo y monitoreo de estado de conservación ambiental, y proporcionan fundamentos para estudios de valoraciones funcionales ecosistémicas.

Palabras clave: modelo digital de elevación, índice de posición batimétrico, modelos logísticos multinomiales Bayesianos, línea base, datos históricos.

INTRODUCCIÓN

Las interacciones ecológicas configuran la distribución de las comunidades marinas, la cual influye a su vez sobre las funciones ecosistémicas que desempeñan, que incluyen la provisión ambiental a las comunidades humanas (protección contra huracanes, captura de carbono, provisión de paisajes atractivos y sustento de actividades pesqueras), así como

la resiliencia de los paisajes marinos, por lo que es estratégico conocer las asociaciones entre las características físicas y biológicas de dichos paisajes (Gladstone-Gallagher et al. 2019, Armoskaite et al. 2020, Borland et al. 2021, Lavalie et al. 2023).

En particular, se reconoce la influencia determinante de la geomorfología (Öhman y Rajasuriya 1998), el relieve y el tipo de sustrato (Khalaf y Kochzius 2002) sobre la distribución de

Acceso abierto

En línea ISSN: 2395-9053

Verificado con Similarity Check impulsado por iThenticate

<https://doi.org/10.7773/cm.v2025.3458>



Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), que permite compartir y adaptar el trabajo, siempre y cuando se dé el crédito apropiado a los autores originales y la fuente, proporcione un enlace a la licencia Creative Commons e indique si se realizaron cambios. Las figuras, tablas y otros elementos del artículo están incluidos en la licencia CC BY 4.0 del artículo, a menos que se indique lo contrario. Debe solicitar permiso al titular de los derechos de autor para utilizar material no cubierto por esta licencia. El título de la revista está protegido por derechos de autor propiedad de la Universidad Autónoma de Baja California, y el título y el logotipo de la revista no están sujetos a esta licencia.

comunidades bentónicas de corales (Mayorga-Martínez et al. 2021), macroinvertebrados en la zona intermareal (Damveld et al. 2018), pastos marinos y macroalgas (Hemminga y Duarte 2000), al grado de que algunos autores proponen la evaluación de la topografía y complejidad del fondo marino como un indicador sustituto de la biodiversidad bentónica para una estrategia rápida de muestreo (Cooper et al. 2019; Schenone et al. 2023, 2025). En este contexto, es relevante enfatizar la pertinencia de evaluar la relación entre las comunidades bentónicas y el fondo marino a múltiples escalas, incluyendo tanto a los componentes individuales de la complejidad como las clases geomorfológicas en sí (Gratwicke y Speight 2005, Pygas et al. 2020).

Los ecosistemas marinos someros del norte de la Península de Yucatán, al sureste de México, se caracterizan por la presencia de sedimentos calcáreos consolidados y no consolidados, en los que se desarrollan comunidades de vegetación acuática sumergida (VAS), como los pastos marinos y las macroalgas. Esas comunidades proveen beneficios clave, tanto tangibles como intangibles, asociados con el ciclo del carbono azul (Cota-Lucero y Herrera-Silveira 2021), facilitan el establecimiento de sedimentos costeros (Short et al. 2006), contribuyen a estabilizar los sedimentos asociados a las playas arenosas aledañas (Christianen et al. 2013, James et al. 2019) y constituyen hábitats críticos para especies de fauna de alto interés comercial y ecológico (Boström et al. 2006, Sandoval-Gío et al. 2020, Chen et al. 2021). Asimismo, son la base de importantes actividades de sustento para diversas comunidades costeras de Yucatán (Rebours et al. 2014, Coronado et al. 2020, Arcos-Aguilar et al. 2021, Quiñones-Peraza et al. 2023).

En esta región se han realizado descripciones de las comunidades de pastos marinos y macroalgas, pero no para todo el litoral norte de la península; tampoco se ha evaluado la complejidad geomorfológica del fondo ni valorado la asociación entre estos componentes ecosistémicos (Bello-Pineda y Hernández-Stefanoni 2007, Cota-Lucero y Herrera-Silveira 2021, López de Olmos Reyes et al. 2023, Ortigón-Aznar et al. 2024). Así, el presente estudio incide con pertinencia y relevancia al aportar productos espacialmente explícitos que coadyuven en la gestión de este territorio marítimo, así como datos históricos que se hacen públicos y constituyen una línea base para evaluar los cambios paisajísticos. Además, se suma a la filosofía de datos oceánicos abiertos promovida por el Decenio de los Océanos, entre otros (Martín et al. 2025).

En este contexto, este estudio presenta una caracterización geomorfológica del fondo marino litoral somero de Yucatán, México, a una escala de paisaje (decenas de kilómetros) y desde una perspectiva de variables físicas del fondo marino. Los objetivos de este estudio fueron: (1) delimitar espacialmente unidades geomorfológicas discretas (estructuras y zonas) a partir de sus componentes de profundidad, pendiente y aspecto; (2) describir las abundancias relativas de grandes grupos de la VAS (pastos marinos, algas verdes, algas rojas, algas pardas y césped algal); y (3) evaluar la

asociación entre la geomorfología y la presencia de los grupos de la VAS presentes en el mismo periodo que la clasificación geomorfológica.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

Yucatán se localiza en el sureste de México, al norte de la península con el mismo nombre, la cual es de origen cársico y cuenta con una plataforma continental submarina de rocas sedimentarias sobre un basamento cristalino del Paleozoico (Lugo-Hubp et al. 1992).

La región carece de ríos superficiales, pero se reconocen flujos laminares subterráneos a través de las estructuras cársticas (Solleiro-Rebolledo et al. 2011). Su costa es una planicie que se caracteriza por ser una franja estrecha de depósitos marinos recientes de origen carbonatado biogénico y un litoral de acumulación (Lugo-Hubp et al. 1992). La zona marina presenta un oleaje de baja energía, con corrientes superficiales dominantes y un transporte potencial de sedimentos de este a oeste como resultado del oleaje (Martínez-López y Parés-Sierra 1998, Enríquez et al. 2010, Appendini et al. 2012). En términos de su geomorfología, solo existe información de levantamientos batimétricos en áreas particulares y de las cartas náuticas (SEMAR 2019).

A su vez, la región alberga ecosistemas diversos y productivos (arrecifes coralinos, colonias de corales blandos, arrecifes rocosos, praderas de pastos marinos y bosques de macroalgas) de interés ecológico (e.g., sitios de refugio y alimentación de gran variedad de especies bentónicas y pelágicas) y comercial para la región (Zarco-Perelló et al. 2013, Palafox-Juárez y Liceaga-Correa 2017, Cota-Lucero y Herrera-Silveira 2021).

El área de este estudio comprendió un polígono de 356 km de longitud con límite a mar abierto hasta la isóbata de -12 m, por lo que el área tiene una amplitud variable. Nuestra área de estudio comprendió una superficie total de 4,968 km² (Fig. 1). La aproximación metodológica se realizó a una escala regional del paisaje (Gladstone-Gallagher et al. 2019, Schenone et al. 2023), basada en técnicas de disciplinas geomáticas y ecológicas para el ensamble de datos físicos, derivados de ecosondas, con datos biológicos a nivel de comunidades y grandes grupos taxonómicos, atendiendo el reto vigente en ciencias marinas de asociar datos en escalas distintas, procurando la eficiencia en la relación entre resolución espacial, cobertura y costos (Lark et al. 2015, Cooper et al. 2019, Brunier et al. 2020, Hao et al. 2023).

Colecta de datos batimétricos

Para la colecta de datos batimétricos se utilizó equipo acústico, con los que se generó un modelo digital de elevación (MDE) que se analizó para delimitar espacialmente unidades geomorfológicas discretas. Para esto, se definieron 170 transectos equidistantes (2 km entre ellos) con dirección

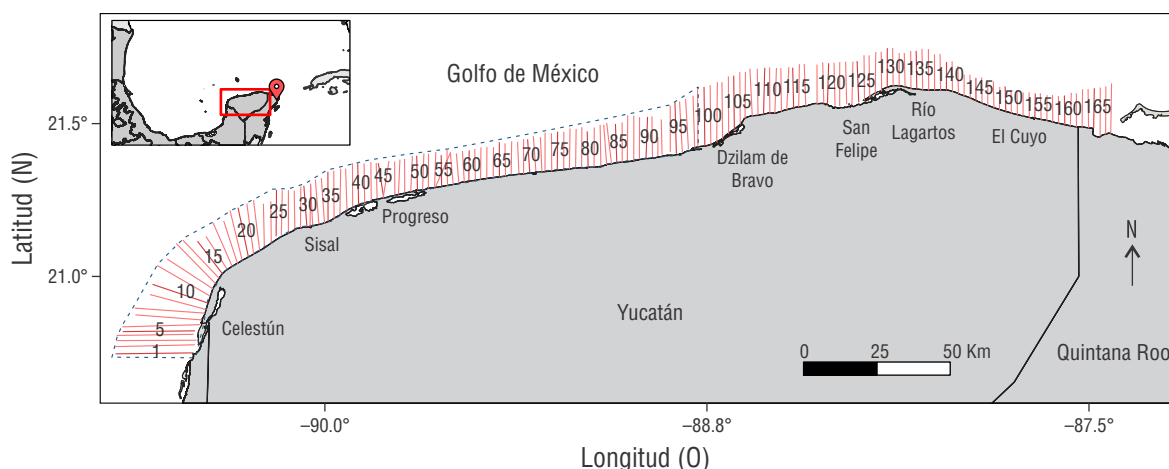


Figura 1. Área de estudio en el litoral somero al norte de la Península de Yucatán. Se presentan los 170 transectos (líneas perpendiculares a la costa color rojo) recorridos durante la colecta de datos batimétricos. La línea punteada gris delimita el área para el análisis de la cobertura vegetal. En la costa se indican los principales puertos de referencia en la zona. En el recuadro de la macrolocalización, el marcador de color rojo señala la ciudad de Cancún, como referencia para ubicación.

norte a sur, perpendiculares a la línea de costa, cubriendo profundidades entre las isóbatas de -0.5 m y -12.0 m (Fig. 1). Estos datos se adquirieron desde una embarcación menor (27 pies de eslora) con motor fuera de borda, a una velocidad media de $12 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, en el periodo de abril de 2012 a junio de 2013. La profundidad se midió con una ecosonda monohaz marca Lowrance (Tulsa, EE.UU.) modelo LMS-37C (frecuencia: 200 MHz; apertura de haz: 35°) acoplada con un sistema de posición global diferencial marca Ashtech (Gates Mills, EE.UU.) modelo Promark 500. Los datos de coordenadas geográficas fueron corregidos ortométricamente en postproceso y, junto con este artículo, se ponen a disposición pública los datos filtrados (<https://goo.su/1RvqsCE>).

La frontera que representa la línea de costa para el modelo batimétrico fue definida mediante su digitalización en imágenes satelitales Landsat del sensor ETM+ (resolución espacial: 30 m) adquiridas en el mes de abril de 2010 (escenas *Path/Row*: 19/045, 20/045 y 21/045).

Clasificación geomorfológica del fondo marino

La distancia entre registros de profundidad sobre cada transecto fue significativamente menor que la distancia entre 2 transectos contiguos, lo que causaba un sesgo en el modelo geoestadístico. Para contender con este desbalance, se seleccionó un subconjunto de registros batimétricos (1,618 registros) a partir de los centroides de una rejilla de cuadros de 2×2 km en el área de estudio, con lo que se homologó la resolución espacial en ambos sentidos.

Con este subconjunto de datos se evaluó su autocorrelación espacial (semivarianza), utilizando el programa *Geostatistics for the Environmental Sciences* (GS+) v. 9.0. Se utilizó la

parametrización de pepita, rango y meseta del modelo teórico con mejor ajuste en el semivariograma para construir un MDE mediante interpolación por Kriging ordinario en el programa ArcMap v. 10.2.2. La exactitud del modelo fue evaluada por un análisis de validación cruzada (valores predichos contra los medidos de profundidad) y por la eficiencia de predicción (Villatoro et al. 2008), para lo que se utilizó un subconjunto de los registros batimétricos originales (195,226 registros; 20% del total de datos originales).

A partir del MDE se calcularon 2 de los principales componentes de la complejidad geomorfológica del fondo marino para su categorización multiescala: pendiente y orientación o aspecto (Wilson et al. 2007). Estos 2 componentes del relieve marino, junto con la profundidad, tienen un papel preponderante en la configuración de las estructuras geomorfológicas del fondo marino (Jerosch et al. 2015, Pygas et al. 2020). En este estudio, la pendiente se definió como el máximo cambio en la elevación del fondo marino dentro de una vecindad determinada, la cual es relevante en la estabilidad de los sedimentos requerida para el establecimiento de la VAS. Asimismo, la orientación o aspecto tiene una influencia directa sobre la posición de las comunidades bentónicas respecto al flujo de las corrientes y al acarreo de nutrientes, y se consideró como la dirección de la máxima inclinación en la misma vecindad (Jerosch et al. 2015, Pygas et al. 2020). Ambas variables fueron generadas en formato ráster con la herramienta *Topographic Properties* del programa TNTmips (Microimages, Raymond, EE.UU.) a partir del MDE.

Para la clasificación geomorfológica del fondo marino se utilizó el programa *Benthic Terrain Modeler* v. 3.0 (ArcGIS v. 10.2.2) con el índice de posición batimétrico (BPI, por sus siglas en inglés), el cual analiza los valores de cada píxel

del MDE respecto a un conjunto de píxeles en una vecindad radial de búsqueda definida por el usuario. Posteriormente, con base en una codificación multivariada de los componentes evaluados (profundidad, pendiente y orientación) y del BPI, el programa BTM asignó una clasificación geomorfológica a cada píxel del MDE (Wilson et al. 2007, Jerosch et al. 2015, Pygas et al. 2020).

El modelo incluyó el análisis del índice BPI a 2 escalas geográficas para el rango de búsqueda radial en su cálculo. En este estudio, los valores de las escalas fina (r) y gruesa (R) se definieron de manera empírica y con base en referencias bibliográficas (Lundblad et al. 2006) con escalas de 1:80,000 y 1:160,000. Estos valores representaron vecindades radiales de 50 y 100 píxeles para cada píxel del MDE, y ambas se estandarizaron tomando como referencia de una desviación estándar y considerando la autocorrelación de los datos batimétricos (Verfaillie et al. 2007).

Con estos parámetros definidos, los cálculos a escalas amplia (BPI_{Amp}) y fina (BPI_{Fin}) del modelo de complejidad geomorfológica se realizaron con la ecuación (1):

$$BPI_x = Z_{Comp} - Z_{Comp_Ajust_x}, \quad (1)$$

donde x es la escala (amplia o fina), Z_{Comp} es el valor de los componentes de la complejidad (profundidad, pendiente y orientación) de la celda Z , y $Z_{Comp_Ajust_x}$ es el valor promedio de los componentes de la complejidad de las celdas dentro del radio de vecindad x (amplia o fina) (Wilson et al. 2007).

Con base en los valores de BPI obtenidos en los modelos de escala amplia y fina, se clasificó cada píxel del MDE como alguna de las zonas o estructuras definidas en un catálogo con valores umbrales (Jerosch et al. 2015) (Tabla 1).

Cobertura de la vegetación acuática sumergida

Se analizaron los patrones de distribución geoespacial de la VAS en las zonas poniente y centro de la costa de Yucatán (de Celestún a Dzilam de Bravo) (Fig. 1). La zona oriente no fue incorporada en este análisis debido a un evento de marea

roja (COFEPRIS 2011), el cual modificó severamente las comunidades bentónicas, un impacto documentado para otras regiones (Lee et al. 2007), por lo que sus condiciones no eran comparables con el resto del área de estudio.

La aproximación metodológica de este estudio fue a escala regional y empleó técnicas estándar probadas para el mapeo de hábitats bentónicos y paisajes marinos (Swanborn et al. 2022, Schenone et al. 2023). Los sitios para la cuantificación de cobertura de la VAS se definieron mediante un diseño de muestreo estratificado aleatorio, reportado como óptimo para el mapeo de VAS (Hirzel y Guisan 2002, Wilson et al. 2019). Se utilizó como base una clasificación no supervisada de 2 imágenes Landsat 7 ETM+ (*paths*: 20 y 21; *row*: 45) de abril 2010, y se aplicó el algoritmo K-medias (15 clases distintas no supervisadas). Se definieron 219 sitios de muestreo distribuidos aleatoriamente al interior de cada clase no supervisada (Mastrantonis et al. 2024), considerando una distancia mínima de separación de 90 m entre sitios (mismo diseño que Palafox-Juárez y Liceaga-Correa 2017). En cada sitio se obtuvo un videotransecto submarino de 5 min siguiendo un método modificado de Aronson y Swanson (1997), con una orientación perpendicular al fondo y a una distancia de 80 cm, cubriendo un área aproximada de 50 m² (1 m de ancho × 50 m de longitud).

Los videos se analizaron siguiendo procedimientos estándar para mapeo de comunidades bentónicas y se realizó a nivel de grupos funcionales (e.g., algas y pastos marinos), lo cual se ha recomendado como una aproximación eficaz y eficiente a escala de paisaje marino (Roelfsema y Phinn 2010, Herkül et al. 2013, Leiper et al. 2014, Greenfield et al. 2016, Pygas et al. 2020). Se utilizó la aplicación *Coral Point Count with Excel extensions* (CPCe) (Kohler y Gill 2006), superponiendo 20 puntos aleatorios de muestreo por fotograma, y se analizaron 28 fotogramas por video, lo que representa aproximadamente una fotografía cada 1.78 m a lo largo del transecto grabado (Díaz-Aguilar 2012, Palafox-Juárez y Liceaga-Correa 2017). Para cada uno de los 20 puntos aleatorios en cada fotograma, se identificó el grupo taxonómico de la VAS presente: pasto marino, alga verde, alga roja, alga parda o césped algal.

Tabla 1. Características utilizadas en la clasificación morfológica del fondo marino de Yucatán. Síntesis de los características morfológicas y sus valores a las escalas amplia y fina (un valor de BPI de 100 corresponde a una desviación estándar) que definen la clasificación morfológica.

Clasificación geomorfológica	Clase	BPI escala amplia		BPI escala fina		Pendiente	
Zonas		Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior
	Elevación	100					
	Planicie	-100	100				0.042
	Pendiente suave	-100	100			0.042	
Estructuras							
	Depresión	-100	100		-100		0.042
	Colina submarina	-100	100	100		0.042	

Influencia de la geomorfología sobre la VAS

Se generó un modelo logístico multinomial Bayesiano (BMLM, por sus siglas en inglés) con una estructura no lineal para reconocer la relación compleja entre las variables geomorfológicas (profundidad, pendiente y orientación) y la presencia de los diferentes grupos taxonómicos de VAS. Se utilizaron *splines* para modelar esta relación (en el caso de la orientación, dada su naturaleza circular, se consideraron *splines* cíclicos). A partir de este modelo, se estimaron las probabilidades de presencia de cada grupo taxonómico de la VAS en función de cada una de las características geomorfológicas del fondo.

Para el caso de las zonas definidas en el modelo BPI a escala amplia, se construyó un segundo BMLM en el que la variable predictora fue la zonificación geomorfológica, obteniéndose de éste estimaciones de la probabilidad de presencia de cada grupo de la VAS para cada zona.

En los 2 modelos BMLM anteriores, para tener probabilidades que sumaran 100%, se consideró un grupo adicional, “Otros”, que incluyó los elementos no vegetales restantes (i.e., laja, roca, arena y otros organismos) en cada punto aleatorio de cada fotograma. No se realizó este análisis para las estructuras debido a su área pequeña, la cual no incluía un número suficiente de sitios de muestreo para dicho análisis. Los BMLM se construyeron con el paquete ‘brms’ (Bürkner 2017, 2018) en R (R Core Team 2020).

RESULTADOS

Colecta de datos batimétricos

Los 170 transectos recorridos sumaron 2,314 km lineales muestreados con la ecosonda monohaz, generando un total de 977,747 registros de profundidad, después de eliminar errores de distinta índole. El transecto de mayor longitud (26.83 km) se registró al oeste, frente al puerto de Celestún, y el de menor longitud (7.42 km) al oriente, frente al puerto de El Cuyo (Fig. 1).

Clasificación geomorfológica del fondo marino

Dada la semivarianza de los datos de profundidad, éstos se ajustaron a un modelo gaussiano isotrópico (pepita = 0.01; meseta = 9.016; rango = 12,903.78 m; $R^2 = 0.967$; RSS = 1.86), y se definió una resolución espacial del MDE de 40 m por píxel, con una correlación alta de validación cruzada ($R^2 = 0.946$) y una eficiencia de predicción del modelo del 99.3%. Esta parametrización fue esencial para la repetibilidad y exactitud de los análisis aquí presentados.

La profundidad (Fig. 2a) y la pendiente (Fig. 2b) variaron de forma paralela a la línea de costa; la orientación presentó su mayor variabilidad de forma perpendicular a ésta (Fig. 2c). La batimetría fue uniforme en sentido longitudinal (E-O) y presentó un patrón consistente en el sentido latitudinal (N-S). Destacó una pendiente discreta con valores menores a un

grado ($<1^\circ$) que generó una planicie homogénea y de orientación predominante norte-noroeste. En conjunto definieron el paisaje geomorfológico del litoral somero estudiado (Fig. 2).

Con los resultados del modelo BPI y la definición de las características geomorfológicas del fondo (Tabla 1), el área de estudio se clasificó en 3 zonas distintas (escala amplia: elevación, planicie y pendiente suave) y 2 tipos de estructuras (escala fina: colinas submarinas y depresiones) (Fig. 3).

En el extremo más lejano de la costa del área de estudio, cerca de la isóbata de -12 m, se identificaron 3 depresiones, tanto a escala amplia como fina, y se clasificaron como estructuras, junto con 3 colinas submarinas o elevaciones aisladas (Fig. 3), de las cuales la localizada en Celestún presentó características morfológicas singulares.

Efecto de la geomorfología en la VAS

Las especies de mayor abundancia de la VAS en el litoral oeste de Yucatán fueron (en orden descendiente): pastos marinos (principalmente *Thalassia testudinum*, aunque también se registró *Syringodium filiforme* y *Halodule wrightii*), algas verdes (Chlorophyta), algas rojas (Rhodophyta), algas pardas (Phaeophyta) y césped algal (mezcla de macroalgas juveniles, especies filamentosas de crecimiento rápido, algas pardas, algas verdes y cianobacterias) (Fig. S1).

Los componentes de la geomorfología (profundidad, pendiente y orientación) tuvieron distintos grados de influencia sobre la probabilidad de presencia de los grupos taxonómicos de VAS (Fig. 4). A partir del primer BMLM (Tabla S1) se identificó que la profundidad fue la variable más importante en determinar la presencia de los grupos taxonómicos de la VAS en el litoral oeste de Yucatán.

Los pastos marinos se distribuyeron en zonas con profundidades menores a los -5 m (Fig. 4a), mostrando un marcado cambio en su presencia con el aumento de la profundidad. Su zona de distribución (Fig. S1) presentó pocas variaciones en pendiente y orientación, por lo que la influencia de estas variables fue mínima (Fig. 4b, c).

Por su parte, las algas verdes se distribuyeron principalmente en áreas con profundidades entre 5 y 7 m (Fig. 4d) y pendientes más pronunciadas (Fig. 4e); la orientación no representó un factor importante para explicar su presencia (Fig. 4f). A su vez, las algas rojas mostraron patrones de asociación con las 3 variables geomorfológicas, distribuyéndose principalmente en las zonas de mayor profundidad, con pendientes más pronunciadas (Fig. 4h) y orientación hacia el norte (Fig. 4i). Finalmente, las algas pardas, aunque tuvieron menor presencia que las algas rojas, se distribuyeron de manera similar a éstas (Fig. 4j-l). El césped algal se distribuyó principalmente en áreas con profundidades mayores a 2.5 m (Fig. 4m), pendientes bajas (Fig. 4n) y orientación hacia el norte del fondo marino (Fig. 4o).

A partir del segundo BMLM, cuya variable explicativa fue la zonificación geomorfológica, se identificó que la zona de elevación presentó la mayor cobertura de pastos marinos

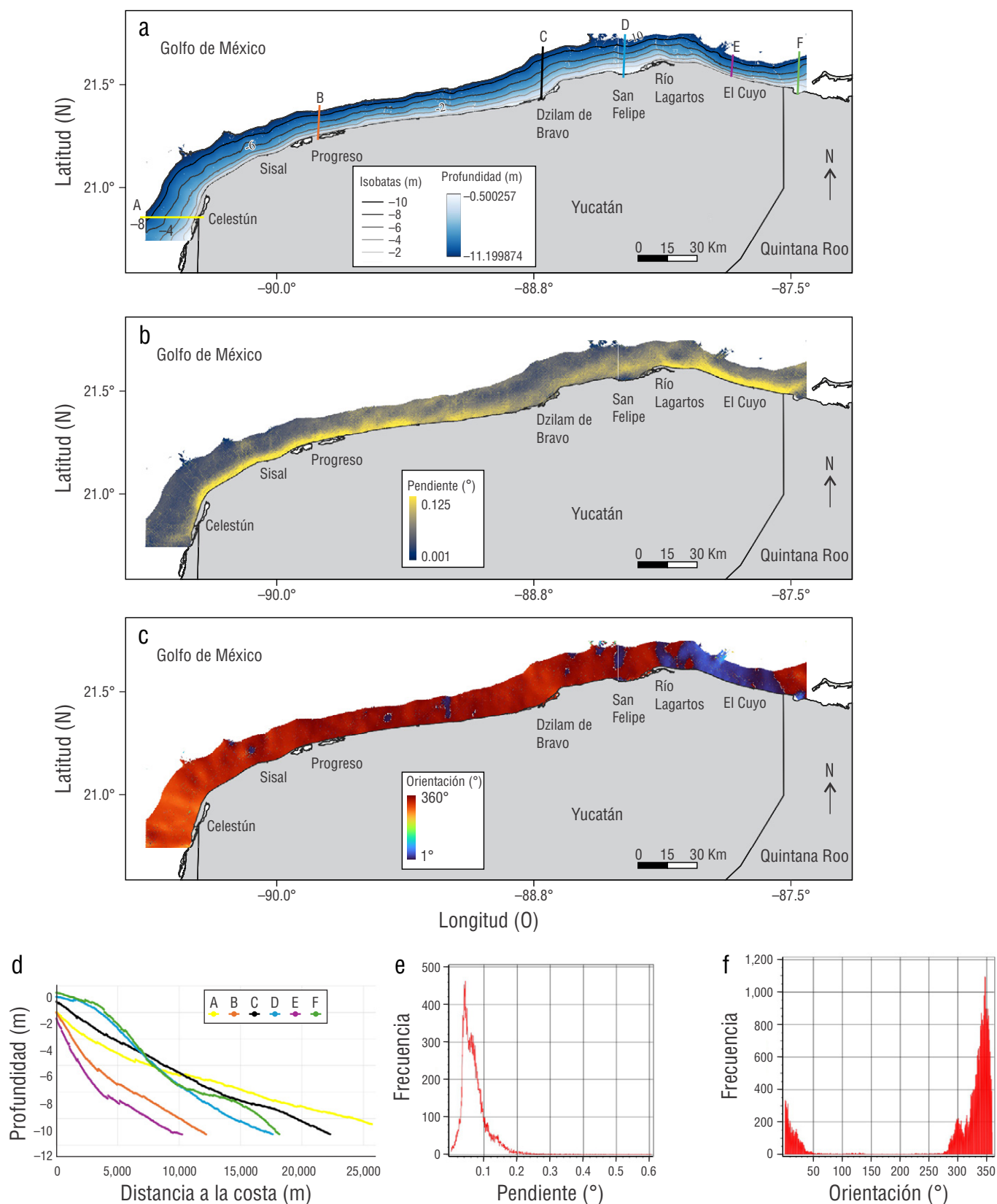


Figura 2. Representación de las variables componentes de la geomorfología del litoral somero del norte de la Península de Yucatán. Del modelo digital de elevación (MDE) (a), se calcularon la pendiente (b) y la orientación (c) del fondo marino. Se presentan perfiles de profundidad (d) señalados en (a), junto con las frecuencias de valores de la pendiente (e) y la orientación (f).

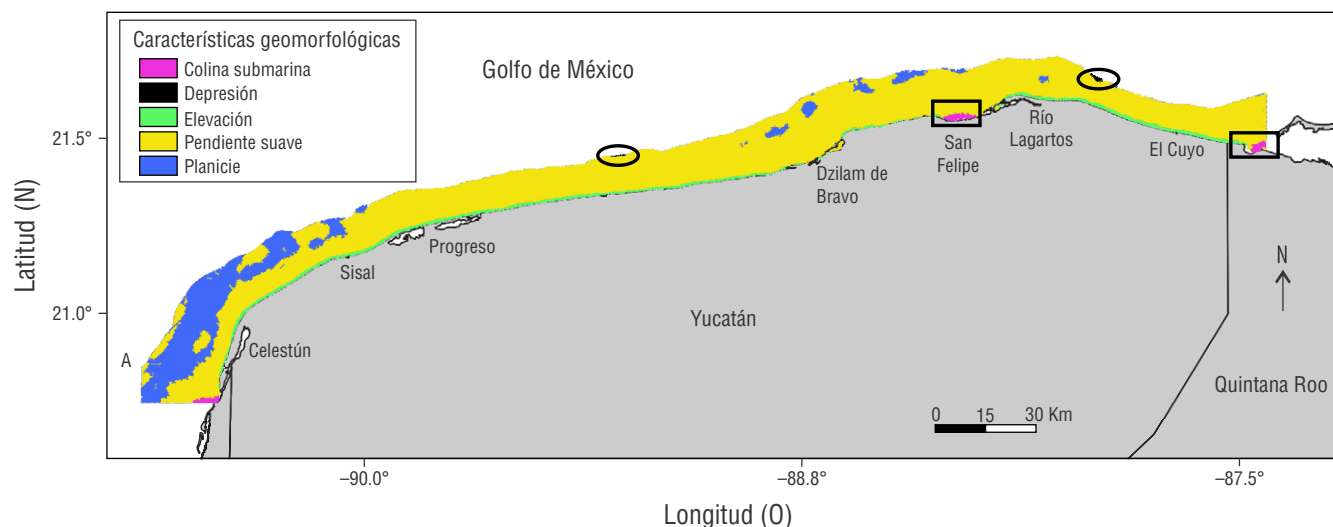


Figura 3. Características geomorfológicas de la superficie del fondo marino litoral de Yucatán; se hacen notar las colinas submarinas, interior de cuadros, y depresiones, interior de elipses.

(39.7%), seguidos por las algas verdes (19%), el césped algal (14.5%), las algas rojas (10.3%) y las algas pardas (2.6%). Esta zona presentó la mayor diversidad de grupos taxonómicos de VAS (pastos marinos, algas verdes, césped algal, algas rojas y algas pardas), así como la mayor presencia de estos, mientras que las zonas de planicie y pendiente suave albergaron principalmente al césped algal, aunque también se encontró presencia de pastos marinos, algas verdes y algas rojas (Tabla 2).

DISCUSIÓN

Mapeo del paisaje marino

Diversos enfoques conceptuales y estudios recientes han promovido la implementación de metodologías y tecnologías variadas, con distinta extensión espacial y de grano, para estudiar la biodiversidad a través de ensamblajes marinos a escala de paisaje, donde la biodiversidad bentónica se evalúa a nivel de grupos funcionales (Gladstone-Gallagher et al. 2019). Esta escala permite abordar la heterogeneidad de los sistemas dentro del paisaje, incluyendo grupos con diferentes requerimientos bióticos y abióticos, redundancia funcional y respuestas variables ante estresores, lo cual es esencial para entender la resiliencia ecológica e identificar potenciales grupos indicadores de procesos ecosistémicos (Kaskela et al. 2017, Brunier et al. 2020, Pygas et al. 2020, Swanborn et al. 2022).

En este contexto, el crecimiento exponencial de las tecnologías de información geográfica (TIG), el desarrollo de técnicas de análisis geomático y la integración de plataformas de observación con escalas múltiples han permitido avances notables en la caracterización física del fondo marino y de las comunidades bentónicas asociadas (Schenone et al. 2023).

Los productos espaciales derivados de esos ensamblajes han fomentado metodologías interdisciplinarias y han contribuido al establecimiento de líneas base comparables en análisis paisajísticos, incluso a escalas interdecadales. Iniciativas de monitoreo operacional en el mar Báltico, el océano Pacífico y otras regiones de Europa han implementado aproximaciones similares con datos multiescala (Kaskela et al. 2017, Hao et al. 2023).

La geomorfología del fondo marino, en particular en regiones someras como la costa norte de Yucatán, no suele experimentar cambios abruptos, incluso tras eventos hidrometeorológicos severos. Por ejemplo, Cuevas et al. (2013a) documentaron movimientos de dunas submarinas en algunas de las zonas analizadas en el presente estudio y reportaron variaciones de apenas 3 a 10 m a lo largo de más de 25 años. Por ello, se considera que la información geomorfológica presentada mantiene su validez temporal.

Dos de las estructuras identificadas, Actam Chuleb y Punta Caracol, ya habían sido previamente descritas (Cuevas et al. 2013b). El presente estudio reporta por primera vez una tercera colina submarina en Celestún, así como 3 depresiones en torno a la isóbata de -12 m, lo cual representa una contribución original al conocimiento del relieve submarino regional. Estas estructuras son particularmente relevantes por asociarse con conjuntos de dunas submarinas, las cuales se mueven y configuran el paisaje con las asociaciones de comunidades de pastos marinos y bosques de macroalgas (Cuevas et al. 2013a).

Patrones ecológicos generales de la vegetación acuática sumergida (VAS)

Si bien es posible que los patrones espaciales actuales de la VAS difieran de los observados al momento del estudio

Tabla 2. Probabilidad de la presencia de cada grupo de la vegetación acuática sumergida (VAS) en cada una de las zonas geomorfológicas identificadas. Valores de probabilidad estimados a partir del modelo logístico multinomial Bayesiano (BMLM, por sus siglas en inglés) que tuvo como variable explicativa a estas zonas. “Otros” incluye los elementos no vegetales que no se corresponden con un grupo taxonómico principal de la VAS (e.g., laja, roca, arena y otros organismos); se incluye “Otros” para mostrar que las probabilidades de presencia suman 100% en cada zona geomorfológica

Zona	Grupo VAS	Probabilidad de presencia (%)	Intervalo de credibilidad del 95%	
Elevación	Pastos marinos	39.7	38.2	41.1
	Algas verdes	19	17.9	20.2
	Algas rojas	10.3	9.4	11.2
	Algas pardas	2.6	2.2	3.1
	Césped algal	14.5	13.5	15.6
	Otros	13.9	12.9	14.9
	Pastos marinos	8.2	7.4	9.2
Planicie	Algas verdes	7.7	6.9	8.6
	Algas rojas	4.1	3.5	4.8
	Algas pardas	6.5	5.7	7.3
	Césped algal	13.8	12.7	14.9
	Otros	59.7	58.1	61.3
Pendiente suave	Pastos marinos	3.9	3.6	4.4
	Algas verdes	10.2	9.7	10.8
	Algas rojas	11.1	10.5	11.7
	Algas pardas	4.9	4.4	5.2
	Césped algal	27.1	26.3	27.9
	Otros	42.8	41.9	43.7

debido a las dinámicas ecológicas del paisaje, se asume que las relaciones ecológicas descritas siguen siendo representativas. Esto se debe a que la complejidad geomorfológica del fondo marino opera a escalas temporales más amplias, proporcionando un marco relativamente estable para el análisis de asociaciones bióticas.

El litoral somero de Yucatán se caracteriza por una baja complejidad topográfica, en la que destacan con claridad las zonas de planicie y pendiente suave, propias del Banco de Campeche, las cuales son claramente identificables con los umbrales definidos para cada elemento diferenciador con el BPI (Wright et al. 2012). Appendini et al. (2012) identificaron una franja crítica para el transporte sedimentario entre las isóbatas de 0 y -3 m, la cual coincide con la zona elevada identificada en este estudio y está asociada con una franja

somera cercana a la línea de costa, en la que se acumula sedimento no consolidado con una dinámica asociada a la de la línea de costa.

La vinculación entre rasgos geomorfológicos y comunidades biológicas es clave para comprender la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas (Ordines et al. 2011). En el presente estudio, la profundidad fue la variable más fuertemente asociada con la presencia de VAS, lo cual es esperable desde un punto de vista ecológico. No obstante, también se documentó la distribución estimada de la VAS por categorías geomorfológicas, así como ciertos patrones de ensamblaje, lo que constituye una contribución original para el sureste del Golfo de México.

Pygas et al. (2020), en su revisión de más de 50 estudios sobre la influencia de la morfología del fondo en comunidades

bentónicas, señalaron que la relación entre la complejidad geomorfológica y la distribución de las macroalgas ha sido poco estudiada. En este sentido, tanto Pygas et al. (2020) como Kaskela et al. (2017) coincidieron en la pertinencia del BPI para evaluar asociaciones de la complejidad morfológica con la distribución de comunidades bentónicas,

demonstrando su eficacia en la identificación de hábitats idóneos para organismos invertebrados. Igualmente, Kaskela et al. (2017) sugirieron que los modelos logísticos aplicados son robustos para evaluar interacciones entre variables geomorfológicas y grupos funcionales, y subrayaron la influencia de la rugosidad, variabilidad del sustrato

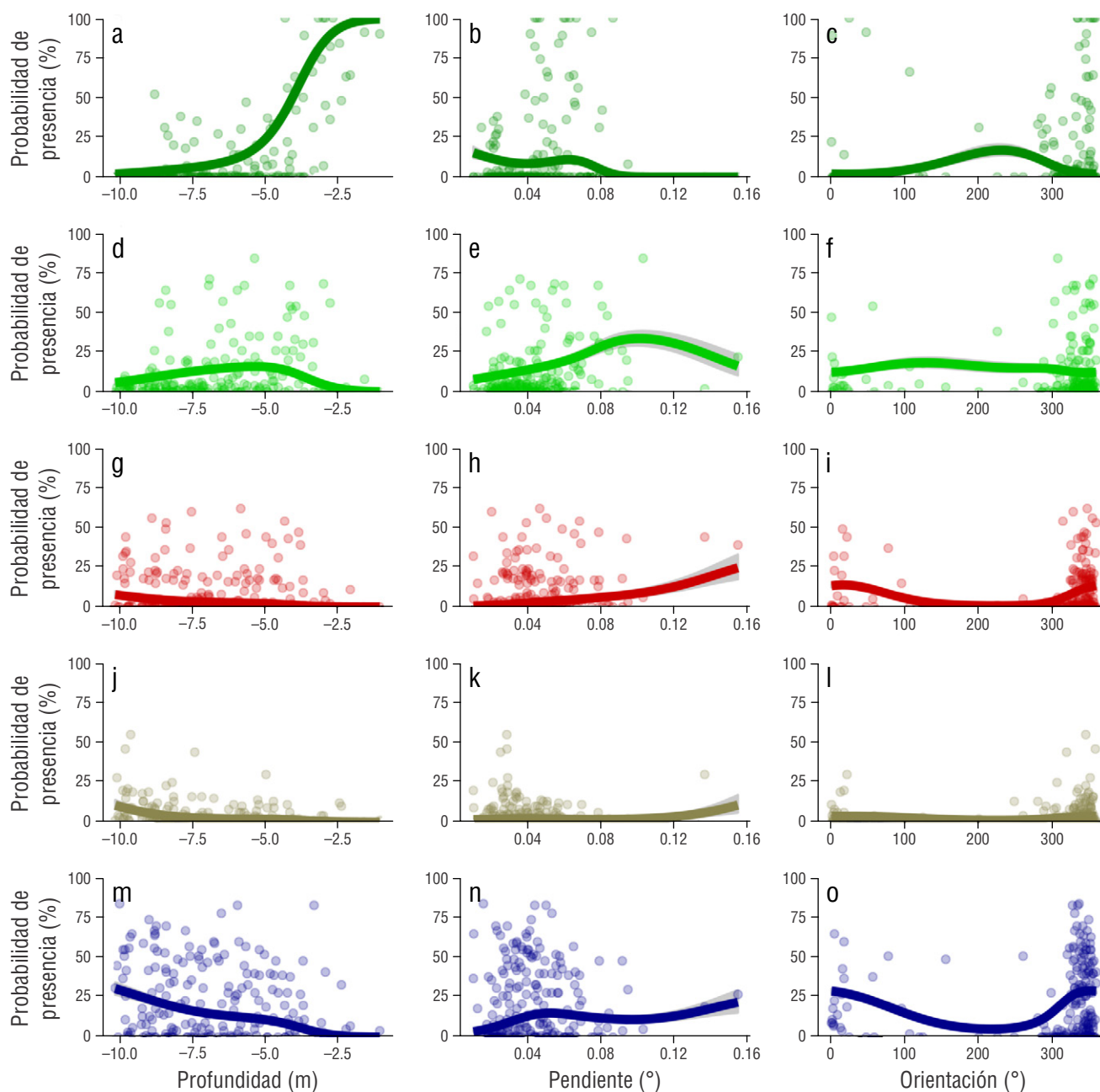


Figura 4. Relaciones no lineales (curvas) estimadas entre las variables geomorfológicas (eje x) y la probabilidad de presencia (eje y) de los 5 grupos taxonómicos de la vegetación acuática sumergida más abundantes en la costa oeste de la Península de Yucatán. Las bandas grises corresponden a las bandas de confianza asociadas a las estimaciones del modelo Bayesiano aditivo logístico multinomial ajustado. Variables geomorfológicas: profundidad (izquierda), pendiente (centro) y orientación (derecha). Grupos taxonómicos: pastos marinos (verde oscuro), algas verdes (verde), algas rojas (rojas), algas pardas (café) y césped algal (azul oscuro). Los puntos corresponden a las observaciones hechas en campo.

y pendiente como características clave en la distribución de comunidades bentónicas.

Documentar y validar patrones locales de asociación entre la VAS y las características del fondo marino fortalece las herramientas para evaluar cambios paisajísticos tras eventos extremos (e.g., huracanes o mareas rojas), o simplemente para comparaciones multitemporales. Las funciones numéricas derivadas de estas asociaciones permiten utilizar características geomorfológicas como variables subrogadas para inferencias ecológicas (Kaskela et al. 2017), como se ha hecho con la microtopografía (Schenone et al. 2024) y la geomorfología de sedimentos (Brunier et al. 2020).

Pese a los avances, Kaskela et al. (2017) señalaron la necesidad de estudios adicionales que clarifiquen las relaciones entre geomorfología y comunidades bentónicas, ya que aún prevalecen ambigüedades. En línea con ello, este estudio resalta la urgencia de realizar análisis a mayor resolución ecológica, incluyendo mediciones *in situ* de variables físicoquímicas clave como salinidad, temperatura y transparencia, las cuales, junto con la geomorfología, gobiernan la distribución espaciotemporal de la VAS.

Implicaciones para la gestión del paisaje submarino en Yucatán

Este trabajo representa la primera categorización sistemática de la complejidad geomorfológica del fondo marino en la costa norte de la Península de Yucatán, estableciendo una línea base para estudios oceanográficos, biológicos y ecológicos en el sureste de México. Además, amplía el conocimiento del litoral somero de Yucatán y contribuye a la comprensión de procesos como la hidrodinámica (Qian et al. 2020), el transporte de sedimentos (Appendini et al. 2012) y el funcionamiento ecológico (Wedding et al. 2008, Palafox-Juárez y Liceaga-Correa 2017), los cuales son fundamentales para la toma de decisiones sobre desarrollo costero, manejo adaptativo y conservación ambiental.

Este estudio también rescata y pone a disposición pública una base de datos batimétrica y de distribución de la VAS con más de 14 años de antigüedad. Este acervo constituye una referencia crítica para estudios de cambio paisajístico, particularmente ante presiones como derrames de petróleo, construcción de infraestructura, florecimientos algales nocivos o efectos del cambio climático (Lotze y Worm 2009, Wilkinson et al. 2011, Hawkins et al. 2013, Thurstan et al. 2015, Bledsoe et al. 2022). Su disponibilidad y análisis promueven una gestión basada en evidencia y fortalecen la resiliencia ecológica y social del litoral yucateco.

CONCLUSIONES

Los resultados estadísticos y espacialmente explícitos presentados en el presente estudio permitieron confirmar el proceso ecológico documentado en otras latitudes de la

influencia que tiene la complejidad geomorfológica sobre la distribución de las comunidades bentónicas, especialmente de VAS. La extensión y las escalas geográfica y ecológica abordadas en este estudio brindan oportunidades de análisis comparativos a nivel de comunidad y paisaje marino, aportando elementos estratégicos para la gestión territorial del área de estudio.

El paisaje de complejidad en la plataforma de Yucatán es singular por su extensión y tasa de cambio pequeña de su pendiente, lo que configura un vasto territorio marino en el que coexisten diversos intereses y vocaciones asociados al paisaje marino bentónico. Esto refuerza la necesidad de implementar estrategias de gestión basadas en información científica y de brindar certeza jurídica plena para asegurar el aprovisionamiento de esos ecosistemas a los océanos en general y a la sociedad yucateca en particular.

DECLARACIONES FINALES

Material suplementario

El material suplementario de este trabajo se puede descargar del siguiente enlace: <https://www.cienciasmarinas.com.mx/index.php/cmarinas/article/view/3458/420421213>.

Agradecimientos

Gracias a C. Díaz-Aguilar por su apoyo en campo y el análisis de los fotogramas y a A L.U. Arellano-Méndez por su trabajo en la colecta y sistematización de datos batimétricos.

Fondos

Este estudio fue financiado por el Fondo Mixto Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI)-Gobierno del Estado de Yucatán a través del proyecto “Caracterización Integral del Fondo Marino-Costero del Estado de Yucatán: Estratigrafía, Micro-Relieve y Comunidades Bentónicas” (#108960).

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Contribuciones de autor

Conceptualización: MAL-C, EC; Curación de datos: LAR-S, HH-N, EBP-J, EC; Análisis formal: MAL-C, EJG, LAR-S, HH-N, EBP-J; Adquisición de financiamiento: MAL-C, EC; Investigación: MAL-C, EJG, LAR-S, EBP-J, EC; Metodología: MAL-EC, LAR-S, EBP-J, EC; Administración del proyecto: MAL-C, EC; Recursos: MAL-C, EC; Software: EJG, HH-N, LAR-S; Supervisión: MAL-C; Validación: EC, EJG; Visualización: EC; Redacción—borrador

original: MAL-C, EJG, EBP-J, EC; Redacción—revisión y edición: LAR-S, HH-N.

Disponibilidad de datos

Se pueden obtener los datos para este estudio a través del autor correspondiente bajo petición razonable.

Uso de herramientas de IA

Los autores no utilizaron ninguna herramienta de inteligencia artificial para este trabajo.

REFERENCIAS

- Appendini CM, Salles P, Mendoza ET, López J, Torres-Freyermuth A. 2012. Longshore Sediment Transport on the Northern Coast of the Yucatan Peninsula. *J Coast Res.* 6:1404-1417. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-11-00162.1>
- Arcos-Aguilar R, Favoretto F, Kumagai JA, Jiménez-Esquivel V, Martínez-Cruz AL, Aburto-Oropeza O. 2021. Diving tourism in Mexico—Economic and conservation importance. *Mar Policy.* 126:104410. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2021.104410>
- Armoskaite A, Purina I, Aigars J, Strake S, Pakalniete K, Frederiksen P, Schroder L, Hansen HS. 2020. Establishing the links between marine ecosystem components, functions and services: An ecosystem service assessment tool. *Ocean Coast Manag.* 193:105229. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2020.105229>
- Aronson RB, Swanson DW. 1997. Video surveys of coral reefs: uni and multivariate applications. In: Lessios HA, Macintyre IG (eds.), 8th International Symposium on Coral Reefs Vol. 2. Panama (Panama): Smithsonian Tropical Research Institute. p. 1441-1446.
- Bello-Pineda J, Hernández-Stefanoni JL. 2007. Comparing the performance of two spatial interpolation methods for creating a digital bathymetric model of the Yucatan submerged platform. *Pan-Am J Aquat Sci.* 2(3):247-254.
- Bledsoe EK, Burant JB, Higino GT, Roche DG, Binning SA, Finlay K, Pither J, Pollock LS, Sunday JM, Srivastava DS. 2022. Data rescue: saving environmental data from extinction. *Proc R Soc B.* 289:20220938. <https://doi.org/10.1098/rspb.2022.0938>
- Borland HP, Gilby BL, Henerson CJ, Leon JX, Schlacher TA, Connolly RM, Pittman SJ, Sheaves M, Olds AD. 2021. The influence of seafloor terrain on fish and fisheries: A global synthesis. *Fish Fish.* 22:707-734. <https://doi.org/10.1111/faf.12546>
- Boström C, Jackson EL, Simenstad CA. 2006. Seagrass landscapes and their effects on associated fauna: a review. *Estuar Coast Shelf Sci.* 68:383-403. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2006.01.026>
- Brunier G, Michaud E, Fleury J, Anthony EJ, Morvan S, Gardel A. 2020. Assessing the relationship between macro-faunal burrowing activity and mudflat geomorphology from UAV-based Structure-from-Motion photogrammetry. *Remote Sens Environ.* 241:111717. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111717>
- Bürkner PC. 2017. brms: An R Package for Bayesian Multilevel Models Using Stan. *J Stat Softw.* 80(1):1-28. <https://doi.org/10.18637/jss.v080.i01>
- Bürkner PC. 2018. Advanced Bayesian Multilevel Modeling with the R Package brms. *R J.* 10(1):395-411. <https://doi.org/10.32614/RJ-2018-017>
- Chen YY, Edgar GJ, Fox RJ. 2021. The nature and ecological significance of epifaunal communities within marine ecosystems. *Oceanogr Mar Biol.* 59:585-720. <https://doi.org/10.1201/9781003138846-9>
- Christianen MJA, van Belzen J, Herman PMJ, van Katwijk MM, Lamers LPM, van Leent PJM, Bouma TJ. 2013. Low-canopy seagrass beds still provide important coastal protection services. *PLoS ONE.* 8(5):e62413. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0062413>
- [COFEPRIS] Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios. 2011. Presencia de Marea Roja en costas nacionales durante 2011; [accessed 2025 Jun 10]. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/162935/Presencia_de_Marea_Roja_en_costas_nacionales_durante_2011.pdf
- Cooper KM, Bolam SG, Downie AL, Barry J. 2019. Biological-based habitat classification approaches promote cost-efficient monitoring: An example using seabed assemblages. *J Appl Ecol.* 56:1085-1098. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13381>
- Coronado E, Salas S, Torres-Irineo E, Chuenpagdee R. 2020. Disentangling the complexity of small-scale fisheries in coastal communities through a typology approach: the case study of the Yucatan Peninsula, Mexico. *Reg Stud Mar Sci.* 36:101312. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2020.101312>
- Cota-Lucero TC, Herrera-Silveira JA. 2021. Seagrass contribution to blue carbon in a shallow karstic coastal area of the Gulf of Mexico. *PeerJ.* 9:e12109. <https://doi.org/10.7717/peerj.12109>
- Cuevas E, Liceaga-Correa MA, Arellano-Méndez L, Rincón-Sandoval LA, Mexicano-Cintora G, Euán-Ávila JJ, Hernández-Núñez H, Mulsow S. 2013a. Análisis espacial y temporal de campos de dunas submarinas en la costa de Yucatán, México. *Rev Biol Mar Oceanogr.* 48(1):99-113. <https://doi.org/10.4067/S0718-19572013000100009>
- Cuevas E, Liceaga-Correa MA, Rincón-Sandoval LA, Mexicano-Cintora G, Arellano-Méndez L, Euán-Ávila J, Hernández-Núñez H, Mulsow S. 2013b. Evaluación morfológica y sedimentológica de campos de dunas submarinas en la costa de Yucatán, México. *Cienc Mar.* 39:83-99. <https://doi.org/10.7773/cm.v39i1.2152>
- Damveld JH, van der Reijden KJ, Cheng C, Koop L, Haaksma LR, Walsh CAJ, Soetaert K, Borsje BW, Govers LL, Roos PC, Olff H, Hulscher JMH. 2018. Video transects reveal that tidal sand waves affect the spatial distribution of benthic organisms and sand ripples. *Geophys Res Lett.* 45:11,837-11,846. <https://doi.org/10.1029/2018GL079858>
- Díaz-Aguilar C. 2012. Caracterización bentónica de la población central de la costa de Yucatán (De Dzilam de Bravo a Ixil), México [dissertation]. [Mexico]: Universidad Autónoma de Baja California Sur. 90 pp.
- Enríquez C, Mariño-Tapia IJ, Herrera-Silveira JA. 2010. Dispersion in the Yucatan coastal zone: Implications for red tide events. *Cont Shelf Res.* 30:127-137. <http://doi.org/10.1016/j.csr.2009.10.005>
- Gladstone-Gallagher RV, Pilditch CA, Stephenson F, Thrush SF. 2019. Linking traits across ecological scales determines functional resilience. *TREE.* 34(12):1080-1091. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2019.07.010>
- Greenfield BL, Kraan C, Pilditch CA, Thrush SF. 2016. Mapping functional groups can provide insight into ecosystem functioning and potential resilience of intertidal sandflats. *Mar Ecol Prog Ser.* 548:1-10. <http://doi.org/10.3354/meps11692>
- Hao H, Lei C, Wang L, Li W, Danyun O, Lijun W, Rimei O. 2023. Using habitat classification and large-scale spatial planning model to identify environmental areas: A case study in the area

- of the Northwest Pacific Ocean. *Mar Policy*. 147:105360. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2022.105360>
- Hawkins SJ, Firth LB, McHugh M, Poloczanska ES, Herbert RJH, Burrows MT, Kendall MA, Moore PJ, Thompson RC, Jenkins SR, Sims DW, Genner MJ, Mieszkowska N. 2013. Data rescue and re-use: recycling old information to address new policy concerns. *Mar Policy*. 42:91-98. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpol.2013.02.001>
- Hemminga, MA, Duarte CM. 2000. *Seagrass ecology*. New York: Cambridge University Press. 298 p.
- Herkül K, Kotta J, Kutser T, Vahtmäe E. 2013. Relating remotely sensed optical variability to marine benthic biodiversity. *PLoS ONE*. 8(2):e55624. <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0055624>
- Hirzel A, Guisan A. 2002. Which is the optimal sampling strategy for habitat suitability modelling. *Ecol. Modell.* 157: 331-341.
- James RK, Silva R, van Tussenbroek BI, Escudero-Castillo M, Mariño-Tapia I, Dijkstra HÁ, Van Westen RM, Pietrzak JD, Candy AS, Katsman CA, et al. 2019. Maintaining tropical beaches with seagrass and algae: A promising alternative to engineering solutions. *BioScience*. 69(2):136-142. <https://doi.org/10.1093/biosci/biy154>
- Jerosch K, Kuhn G, Krajnik I, Scharf FK, Dorschel B. 2015. A geomorphological seabed classification for the Weddell Sea, Antarctica. *Mar Geophys Res.* 37:127-141. <https://doi.org/10.1007/s11001-015-9256-x>
- Kaskela AM, Rousi H, Ronkainen M, Orlova M, Babin A, Gogoberidze G, Kostamo K, Kotilainen AT, Neevin I, Ryabchuk D, et al. 2017. Linkages between benthic assemblages and physical environmental factors: The role of geodiversity in Eastern Gulf of Finland ecosystems. *Cont Shelf Res.* 142:1-13. <http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2017.05.013>
- Khalaf MA, Kochzius M. 2002. Community structure and biogeography of shore fishes in the Gulf of Aqaba, Red Sea. *Helgol. Mar Res.* 55:252-284. <https://doi.org/10.1007/s10152-001-0090-y>
- Kohler KE, Gill SM. 2006. Coral Point Count with Excel extensions (CPCe): A Visual Basic program for the determination of coral and substrate coverage using random point count methodology. *Comput Geosci.* 32(9):1259-1269.
- Lark RM, Marchant BP, Dove D, Green SL, Stewart H, Diesing M. 2015. Combining observations with acoustic swath bathymetry and backscatter to map seabed sediment texture classes: the empirical best linear unbiased predictor. *Sediment Geol.* 328:17-32. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sedgeo.2015.07.012>
- Lavialle G, Boussaire G, Kopp D, Morfin M, Mouchet MA. 2023. Mapping marine ecosystem services in a multifunctional seascape: the case of Grande Vasière (Bay of Biscay). *Front Mar Sci.* 10:1110299. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1110299>
- Leiper IA, Phinn SR, Roelfsma CM, Joyce KE, Dekker AG. 2014. Mapping coral reef benthos, substrates, and bathymetry, using compact airborne spectrographic imager (CASI) data. *Remote Sens.* 6:6423-6445. <https://doi.org/10.3390/rs6076423>
- Lee KS, Park JI, Kim YK, Park SR, Kim JH. 2007. Recolonization of *Zostera marina* following destruction caused by a red tide algal bloom: the role of new shoot recruitment from seed Banks. *Mar Ecol Prog Ser.* 342:105-115.
- Lópes de Olmos-Reyes YS, Gallegos-Martínez ME, Ressler RA, Hernández-Cárdenas G. 2023. Changes in submerged aquatic vegetation cover off the northern Yucatán Peninsula detected with Sentinel-2 imagery using a fuzzy classification system. *Remote Sens. Appl.: Soc. Environ.* 32: 101008. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.101008>
- Lotze HK, Worm B. 2009. Historical baselines for large marine animals. *Trends Ecol Evol.* 24(5):254-262. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2008.12.004>
- Lugo-Hubp J, Aceves-Quesada JF, Espinosa-Pereña R. 1992. Rasgos geomorfológicos mayores de la península de Yucatán. *Rev Mex Cienc Geol.* 10(2):143-152.
- Lundblad ER, Wright DJ, Miller J, Larkin EM, Rinehart R, Naar DF, Donahue BT, Anderson S.M., Battista T. 2006. A Benthic Terrain Classification Scheme for American Samoa. *Mar Geod.* 29(2):89-111. <https://doi.org/10.1080/01490410600738021>
- Martin PE, Holmes EE, Mayorga E, Ansong JK, Bhaskar U, Cornejo-Donoso J, Correa-Chilón D, Damaoah R, Fierro-Arcos D, Gómez-Navarro L, et al. 2025. Harnessing marine open data science for ocean sustainability in Africa, South Asia, and Latin America. *Oceanogr* 38(1):59-66. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2025.121>
- Martínez-López B, PArés-Sierra A. 1998. Circulación del Golfo de México inducida por mareas, viento y la corriente de Yucatán = Circulation in the Gulf of Mexico induced by tides, wind and the Yucatan current. *Cienc Mar.* 24(1):65-93. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2025.121>
- Mastrantonis S, Langlois T, Radford B, Spencer C, de Lestang S, Hickey S. 2024. Revealing the impact on spatial bias in survey design for habitat mapping: a tale of two sampling designs. *Remote Sens Appl Soc Environ.* 36:101327. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2024.101327>
- Mayorga-Martínez M, Bello-Pineda J, Perales-Valdivia H, Pérez-España H, Heyman WD. 2021. Characterizing Geomorphology of Mesophotic Coral Reef Ecosystems in the Southwestern Gulf of Mexico: Implications for Conservation and Management. *Front Mar Sci.* 8:639359. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.639359>
- Öhman Marcus C, Rajasuriya A. 1998. Relationships between habitat structure and fish communities on coral. *Environ Biol Fishes* 53:19-31.
- Ordines F, Jordà G, Quetglas A, Flexas M, Moranta J, Massutí E. 2011. Connections between hydrodynamics, benthic landscape and associated fauna in the Balearic Islands, western Mediterranean. *Cont Shelf Res.* 31:1835-1844. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2011.08.007>
- Ortegón-Aznar I, Suárez AM, Martínez-Daranas B, Álvarez-Rocha M, Galindo-De Santiago C, Castillo-Cupul RE, Simões N. 2024. Macroalgae of the Campeche Bank, Gulf of Mexico. *Biodivers. Data J.* 12:e141321. <https://doi.org/10.3897/BDJ.12.e141321>
- Palafox-Juárez EB, Liceaga-Correa MA. 2017. Spatial diversity of a coastal seascape: Characterization, analysis and application for conservation. *Ocean Coast Manag.* 136:185-195. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2016.12.002>
- Pygas DR, Ferrari R, Figueira WF. 2020. Review and meta-analysis of the importance of remotely sensed habitat structural complexity in marine ecology. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 235:106468. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2019.106468>
- Qian Y, Forghani M, Lee JH, Farthing M, Hesser T, Kitanidis P, Darve E. 2020. Application of deep learning-based interpolation methods to nearshore bathymetry. *arXiv*. 2011.09707v1[stat.ML]
- Quiñones-Peraza A, Villegas-Hernández H, Guillén-Hernández S, Poot-López GR. 2023. Recreational fishing and angling tournaments in the Yucatan coast (Campeche Bank, Mexico): social and biological dimensions. *Reg Stud Mar Sci.* 61:102897. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2023.102897>
- R Core Team. 2020. R: A language and environment for statistical computing. Vienna (Austria): R Foundation for Statistical Computing. <http://www.R-project.org/>
- Rebours C, Marinho-Soriano E, Zertuche-González JA, Hayashi L, Vásquez JA, Kradolfer P, Soriano G, Ugarte R, Abreu MH, Bay-Larsen I, Hovelsrud G, Rødven Robledo D. 2014. Seaweeds:

- an opportunity for wealth and sustainable livelihood for coastal communities. *J Appl Physcol*. 26:1939-1951.
<https://doi.org/10.1007/s10811-014-0304-8>
- Roelfsema C, Phinn S. 2010. Integrating field data with high spatial resolution multispectral satellite imagery for calibration and validation of coral reef benthic community maps. *J Appl Remote Sens*. 4:043527.
<https://doi.org/10.1117/1.3430107>
- Sandoval-Gío JJ, Avilés-Ramírez G, Ortiz-León HJ, Zamora-Bustillos R, Rosas-Correa CO, Castro-Pérez JM. 2020. Effects of the octopus fishery on the American horseshoe crab population in the Ría Lagartos Biosphere Reserve, Mexico = Efectos de la pesquería del pulpo sobre la población de la cacerolita de mar en la Reserva de la Biosfera Ría Lagartos, México. *Cienc Mar*. 46(2):77-88.
<https://doi.org/10.7773/cm.v46i2.2992>
- Schenone S, Azhar M, Delmas P, Thrush SF. 2023. Towards time and cost-efficient habitat assessment: Challenges and opportunities for benthic ecology and management. *Aquatic Conserv: Mar Freshw Ecosyst*. 33:1603-1614.
<https://doi.org/10.1002/aqc.4024>
- Schenone S, Hewitt JE, Hillman J, Gladstone-Gallagher R, Gammal J, Pilditch C, Lohrer AM, Ferretti E, Azhar M, Delmas P, et al. 2025. Seafloor sediment microtopography as a surrogate for biodiversity and ecosystem functioning. *Ecol Appl*. 35:e3069.
<https://doi.org/10.1002/eap.3069>
- [SEMAR] Secretaría de Marina. 2019. Catálogo de Cartas y Publicaciones Náuticas; [accessed 2025 Jun 11]. <https://digaohm.semar.gob.mx/hidrografia/imageneshidrografia/CatalogoCartasyPubNauticas.pdf>
- Short FT, Koch EW, Creed JC, Magalhães KM, Fernandez E, Gaeckle JL. 2006. SeagrassNet monitoring across the Americas: case studies of seagrass decline. *Mar Ecol*. 27(4):277-289.
<https://doi.org/10.1111/j.1439-0485.2006.00095.x>
- Solleiro-Rebolledo E, Cabadas-Báez HV, Pi PT, González A, Fedick SL, Chmilar JA, Leonard D. 2011. Genesis of hydromorphic Calcisols in wetlands of the northeast Yucatan Peninsula, Mexico. *Geomorphology*. 135:322-331.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.02.009>
- Swanborn DJB, Huvenne VAI, Pittman SJ, Woodall LC. 2022. Bringing seascape ecology to the deep seabed: A review and framework for its application. *Limnol Oceanogr*. 67:66-88.
<https://doi.org/10.1002/lno.11976>
- Thurstan RH, McClenachan L, Crowder LB, Drew JÁ, Kittinger JN, Levin OS, Roberts CM, Pandolfi JM. 2015. Filling historical data gaps to foster solutions in marine conservation. *Ocean Coast Manag*. 115:31-40.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.04.019>
- Verfaillie E, Doornenbal P, Mitchell AJ, White J, Van Lancker V. 2007. The bathymetric position index (BPI) as a support tool for habitat mapping. European Community. Worked example for the MESH Final Guidance. 14 p.
- Villatoro M, Henríquez C, Sancho F. 2008. Comparación de los interpoladores IDW y Kriging en la variación espacial de pH, Ca, CICE y P del suelo. *Agr Costarr*. 32(1):95-105.
- Wedding LM, Friedlander AM, McGranaghan M, Yost RS, Monaco ME. 2008. Using bathymetric lidar to define nearshore benthic habitat complexity: Implications for management of reef fish assemblages in Hawaii. *Remote Sens Environ*. 112(11):4159-4165.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2008.01.025>
- Wilkinson C, Woodruff SD, Brohan P, Claesson S, Freeman E, Koek F, Lubker SJ, Marzin C, Wheeler D. 2011. Recovery of logbooks and international marine data: the RECLAIM project. *Int J Climatol*. 31:968-979.
<https://doi.org/10.1002/joc.2102>
- Wilson KL, Skinner MA, Lotze HK. 2019. Eelgrass (*Zostera marina*) and benthic habitat mapping in Atlantic Canada using high-resolution SPOT 6/7 satellite imagery. *Estuar Coast Shelf Sci*. 226:106292.
<https://doi.org/10.1016/j.ecss.2019.106292>
- Wilson MFJ, O'Connell B, Brown C, Guinan JC, Grehan AJ. 2007. Multiscale terrain analysis of multibeam bathymetry data for habitat mapping on the continental slope. *Mar Geod*. 30:3-35.
<https://doi.org/10.1080/01490410701295962>
- Wright DJ, Pendleton M, Boulware J, Walbridge S, Gerlt B, Eslinger D, Sampson D, Huntley E. 2012. ArcGIS Benthic Terrain Modeler (BTM), v. 3.0. Massachusetts (USA): Environmental Systems Research Institute, NOAA Coastal Services Center, Massachusetts Office of Coastal Zone Management.
- Zarco-Perelló S, Mascaró M, Garza-Pérez R, Simoes N. 2013. Topography and coral community of the Sisal Reefs, Campeche Bank, Yucatán, México = Topografía y comunidad coralina de los arrecifes de Sisal, Banco de Campeche, Yucatán, México. *Hidrobiologica*. 23(1):28-41.